

# 风荷载分布模式下高层建筑动力响应的比较研究

Thida Htun

缅甸联邦共和国 仰光 民族青年资源开发学位学院土木工程系

**摘要:** 在本研究中, 分析了倾斜和正交风条件下的荷载模式, 以确定响应增加或减少的程度。随着建筑物高度的增加, 其受风影响的脆弱性也会增加。规范和标准使用“阵风荷载系数”(GLF) 方法来估计 0、45 和 90 度对高层结构的动态影响。在风荷载的实际情况下, 这些条件不适用于强风响应。为了获得其他倾斜风向的响应, 假设各种类型的荷载模式施加风荷载。对于强风下结构的动力响应分析, 使用频域的谱响应方法或时域运动方程的逐步积分。本文旨在就高层建筑动态风荷载的阵风响应系数 (GRF), 对顺风和横风响应中的各种斜风和正交风荷载模式进行比较。在这项研究中, 对仰光地区和沿海地区的强风模型进行了分析。然后, 对强风作用下的最大结构响应进行了比较。

**关键词:** 高层柔性结构; 阵风响应系数 (GRF); 荷载模式; 斜风; 正交风

## A Comparative Study for Dynamic Responses of Tall Buildings Due to Wind Load Distribution Patterns

Thida Htun

Department of Civil Engineering, Nationalities Youth Resource Development Degree College, Yangon, The Republic of the Union of Myanmar

**Abstract:** In this study, the loading pattern of skewed and orthogonal wind condition is analysed to find how much increased or reduced response. As the height of the buildings increases, its vulnerability to wind effects also increases. Codes and Standards utilize the “gust loading factor” (GLF) approach for estimating dynamic effect on high-rise structures for 0, 45 and 90 degree. At the real situation of wind load, these conditions are not covered for strong wind responses. In order to get the responses of other skewed wind direction, various type of loading patterns is assumed to apply the wind load. For the dynamic response analysis of a structure under strong winds, the spectral response method in a frequency domain or the step-by-step integration of motion equation in a time domain is used. This paper aims to make a comparison of various loading patterns of skewed and orthogonal wind in along-wind and across-wind response with respect to the gust response factor (GRF) of dynamic wind load on tall buildings. In this study, the model building is analysed for strong wind in Yangon area and costal area. Then, comparison of maximum structural responses for strong wind is studied.

**Keywords:** High-rise flexible structures; Gust response factor (GRF); Loading patterns, Skewed wind; Orthogonal wind

### 1. 引言

风是一种非常复杂的现象, 因为风与结构相互作用产生了许多流动情况。风是建筑设计中必须考虑的最重要的自然力。建筑物上的风荷载特性在时间和空间维度上持续变化。建筑物的适当设计取决于能否成功预测湍流风力的实际影响, 以说明在特定设计期间可能出现的最关键的设计场景。顺风力波动在很大程度上是由接近气流湍流产生的, 但横风力和扭转的波动通常主要由旋涡脱落引起, 从而导致建筑围护结构周围的不对称压力分布。风会在建筑表面上产生三维动态荷载, 这种荷载在空间和时间上都会发生变化。气象数据、地理信息以及建筑物几何形状和周围环境显著影响建筑物上湍流风荷载的变化<sup>[1]</sup>。缅甸在 4 月至 5 月和 10 月至 11

月的季风前后季节容易受到孟加拉湾气旋的影响。这些气旋是导致暴雨、洪水和风暴的原因, 尤其是在若开邦沿海地区, 每 3-4 年就会发生一次灾害。

根据目前风工程知识的现状, 采用了三种方法来评估结构上的风荷载。它们是静态分析、动态分析和风洞试验。本研究的目的是比较倾斜风和正交风的各种荷载模式下最大响应的阵风响应系数。

### 2. 方法

如果风荷载在比建筑物周期长得多的时间内增加和消失, 阵风可被视为静荷载。除此之外, 对于非常刚性的结构, 由于风荷载引起的挠度不会很大, 并且该结构也被称为“静态”。如果阵风达到最大值, 并在比结构周期短得多的时间

间隔内消失，则成为动态情况。在动态结构的情况下，存在与结构运动的额外相互作用。当结构足够灵活时，对风荷载的响应对结构的设计至关重要。风荷载的动态响应取决于风气候、大气边界层、湍流财产、风速随高度的变化、空气动力和湍流边界层<sup>[2]</sup>。

风是由许多不同大小和旋转特性的涡流组成的，这些涡流在相对于地球表面运动的一般气流中携带。这些涡流使风具有阵风或湍流的特征。低层大气中强风的阵风很大程度上源于与地表特征的相互作用。十分钟或更长时间内的平均风速随着高度的增加而增加，而阵风则随着高度的降低而降低。某一点的风矢量可以被视为平均风矢量（静态分量）和动态或湍流分量的总和。湍流的结果是结构上的动态载荷取决于涡流的大小。

### 2.1 等效静风荷载法

风荷载的确定基于 ASCE7-05，该标准使用距地面 33 英尺处的平均 3 秒阵风作为测量标准。分析法用于获得建筑物各层的速度压力。速度压力由下式给出

$$q_z = 0.00256 K_z K_{zt} K_d V^2 I \quad (1)$$

建筑表面上的设计风压或吸力由以下方程式给出：

$$P_z = q_z \times G_f \times C_p \quad (2)$$

式中， $P_z$ =设计风压或吸力，单位：psf

$q_z$ =速度压力，单位：psf

$C_p$ =压力系数

$K_{zt}$ =地形系数

$I$ =重要性系数

$V$ =基本风速，mph

$K_d$ =风向系数

计算建筑物主要抗风系统设计风压所需的阵风系数  $G_f$ ，可计算为

$$G_f = 0.925 \left[ \frac{1 + 1.7 I_z \sqrt{(g_z Q)^2 + (g_z R)^2}}{1 + 1.7 g_z I_z} \right] \quad (3)$$

可使用 ASCE7-05[3]中的以下规范确定最大顺风位移和加速度。

$$X_{max} = \frac{\Phi_{(z)} \rho B H C_{fk} V_z^2}{2 m_i (2 \pi n)^2} K G \quad (4)$$

$$g_x = \sqrt{2 \ln(nT)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln(nT)}} \quad (5)$$

$$\sigma_{\ddot{x}} = \frac{0.85 \Phi_{(z)} \rho B H C_{fk} V_z^2}{m_i} I K R \quad (6)$$

$$\ddot{x} = g_x \sigma_{\ddot{x}} \quad (7)$$

式中， $X_{max}$ =沿风位移的最大值

$\ddot{x}$ =加速度

在 ASCE7-05 中，建筑物顶部的最大加速度大于 20mill-g，建议对动态分析进行进一步调查。除了加速度之外，许多其他因素（如视觉线索、身体位置和方向以及风暴期间乘员的精神状态）都会影响人类对运动的感知，ASCE7-05 建议将加速度暂定为重力的 1%至 3%。较低的值被认为适用于公寓楼，较高的值适用于办公楼<sup>[9]</sup>。

Level	Acceleration (m/sec <sup>2</sup> )	Effect
1	< 0.05	Human cannot perceive motion.
2	0.05 – 0.1	Sensitive people can perceive motion. Hanging objects may move slightly. Level of motion affects desk work.
3	0.1 – 0.25	Longterm exposure may produce motion sickness.
4	0.25 – 0.4	Desk work becomes difficult or almost impossible.
5	0.4 – 0.5	Difficult to work naturally and standing people may loss balance.
6	0.5 – 0.6	Unable to walk naturally.
7	0.6 – 0.7	People cannot tolerate motion or walk.
8	> 0.85	Objects begin to fall.

Source [9]

表 1. 人体对加速度的敏感度。

### 2.2. 风谱

湍流的光谱描述是解释阵风序列中所含能量的一种方便工具。风谱描述了湍流随频率的分布。频谱（即频谱密度函数）表示各种频率范围对方差（ $\sigma^2$ ，风速分量标准偏差的平方）的贡献。风力谱以无量纲形式表示。风力谱有许多数学模型<sup>[2]</sup>。

### 2.3. 气动导纳

对于理想的准稳态条件，导纳函数是整个谱上入射湍流的单位，任何偏离单位的情况都将被视为偏离准稳态条件。计算了几个截面的气动导纳函数，并与风洞试验结果进行了比较<sup>[2]</sup>。这定义为将入射垂直阵风速度谱与相关升力谱相关的传递函数。气动导纳  $x$  用于考虑结构和气流的相互作用。

这是全区域风压分布的传递函数，也是连接迎面风速和诱导空气动力的传递函数<sup>[4]</sup>。

### 2.4.阵风响应系数

阵风响应系数是峰值结构响应除以平均风引起的平均响应的比率。GRF 通常考虑可能的共振“动态效应”和“尺寸效应”。GRF 方法包括指定力 F，如果静态施加，将导致系统达到其预期峰值响应。Davenport 提出的阵风响应系数的推导最终进入 ASCE<sup>[5]</sup>。

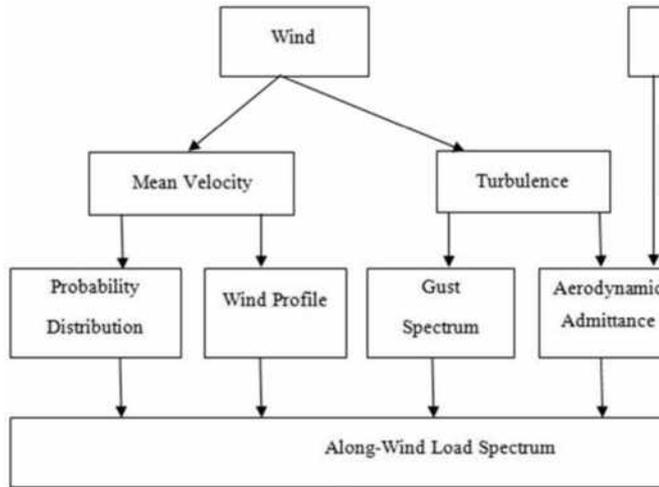


图 1.动态顺风荷载评估方案

### 3.1.假设模型

假设的建筑模型是具有不同纵横比的矩形和方形平面，以及带有支撑框架的钢结构建筑。支撑框架和重力框架中的梁和支撑连接建模为固定，而力矩框架中的梁连接建模为完全固定。地板均建模为刚性隔板。建筑支架建模为在弯矩框架方向完全固定，并在支撑框架方向固定。柱为矩形 HSS 截面，所有其他构件均为典型的轧制 W 形截面。采用 LRFD 设计理念，设计构件以满足荷载组合。

### 3.2.案例研究计划

等效静风荷载采用 ASCE7-05 中阵风系数的分析方法确定。案例研究的模型仅包括主要承重部件。模型中不包括中间柱、其他次要结构构件和非结构构件。混凝土楼板通常具有非常高的平面内刚度。因此，它们在模型中被简化为刚性隔板。这种简化可以显著减少建筑物横向（水平）动力分析中要解决的特征值问题的大小<sup>[10]</sup>。

在本研究中，将根据各种条件的原因考虑荷载模式。荷载模式 1 用于全风压，以获得最大响应，并可能导致建筑物倾斜。使用荷载模式 2，即全风压应仅应用于部分墙面，以使风致扭转最大化。荷载模式 3 和荷载模式 4 进行了研究，

因为拉动和推动水平压力将同时到达建筑物。全压是指风的直接作用，0.75 压力将是由于建筑物侧面的横向风荷载分布。考虑扭转荷载情况时，应考虑荷载模式 5。对荷载模式 6 和荷载模式 7 进行了研究，以说明斜风可能产生的更严重的影响，以及结构在横风方向上摇摆的趋势，应设计更高的结构，以抵抗同时施加的每个主要方向 75%的最大风压<sup>[11][12]</sup>。

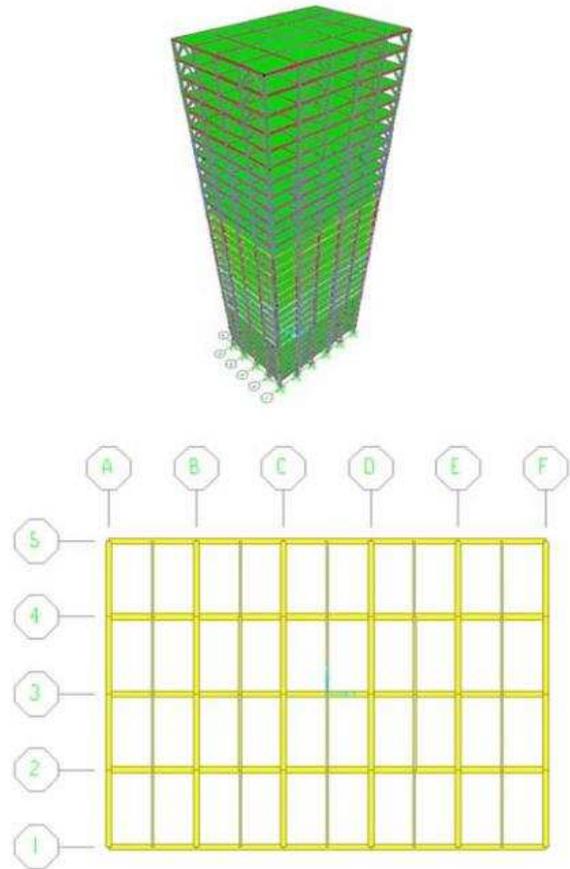


图 2.模型建筑的三维视图和楼层平面图。

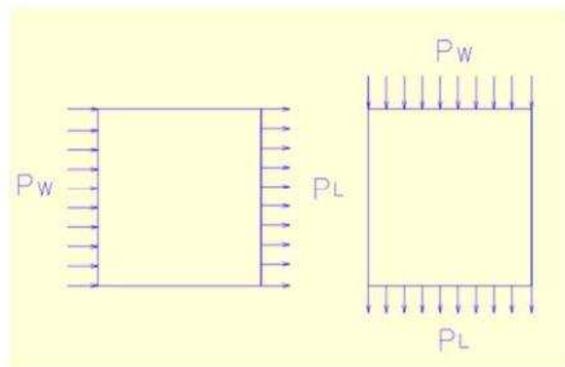


图 3.加载模式 1。

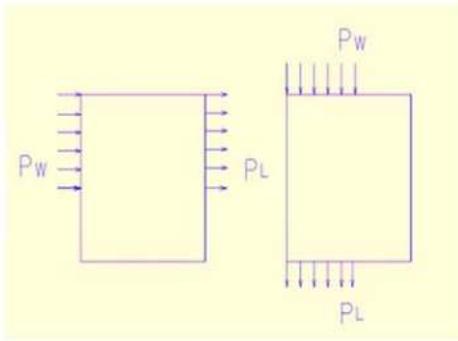


图 4.加载模式 2。

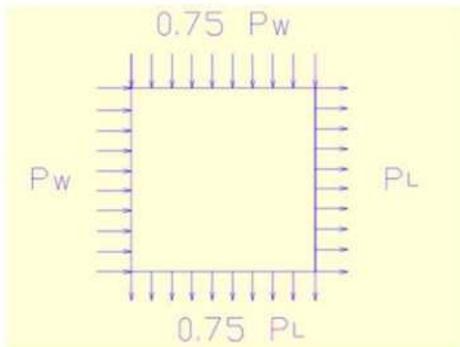


图 5.加载模式 3。

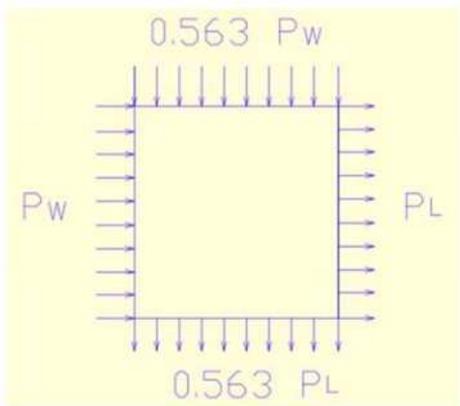


图 6.加载模式 4

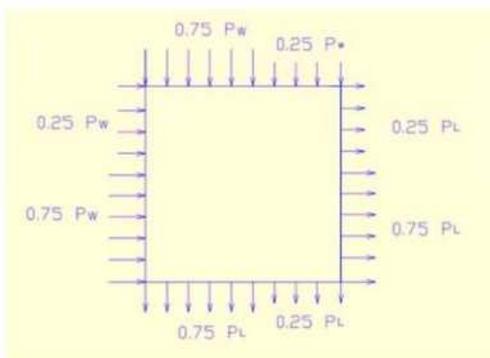


图 7.加载模式 5。

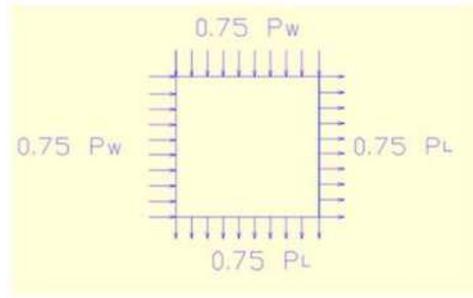


图 8.加载模式 6。

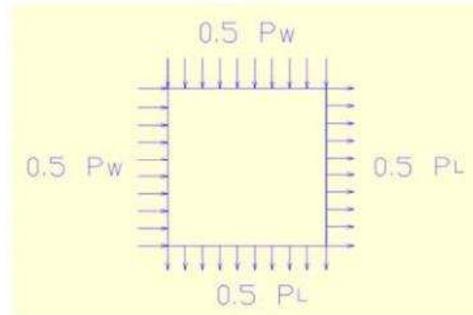


图 9.加载模式 7。

斜风和正交风的抖振响应根据上述荷载模式和流程图进行。

结构分析中使用的风荷载数据如下：

- (1) 建筑类别: -II
- (2) 基本风速: -120 mph 和 90 mph
- (3) 暴露类型: -C 和 B
- (4) 背风系数: -0.5
- (5) 迎风系数: -0.8
- (6) 重要性系数: -1
- (7) 阻尼比: -5%

本研究选择暴露 C，代表气旋风区，选择暴露 B 代表郊区。第一项工作是“固有频率分析”，它给出了建筑物振动的基本频率。运行模型以获得用于确定所有分析情况下阵风系数的近似自然频率输入。

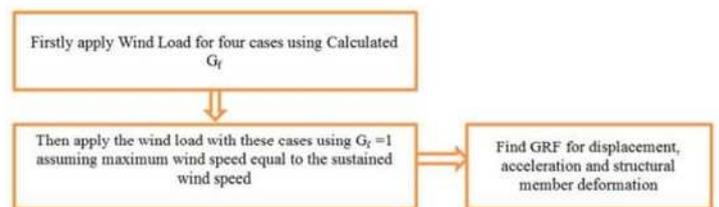


图 10.分析方案流程图。

Building Type	Storey	Building Dimension	Slenderness Ratio	Natural frequency of Building (Hz)
Sq-1	30	75'x75'x341'	4.5	0.4
Sq-2	40	75'x75'x451'	6.0	0.3
Re-1	30	60'x100'x345'	5.6	0.3
Re-2	40	60'x100'x455'	7.5	0.2

表 2.构建分析信息。

#### 4.结果和讨论

在本研究中，荷载模式条件下的比例因子表示 30 度和 60 度的倾斜风，然后将案例研究模型的响应与正交风（0 度和 90 度）和倾斜风（45 度）的规范定义比例因子的差异进行比较，力矩和加速度。

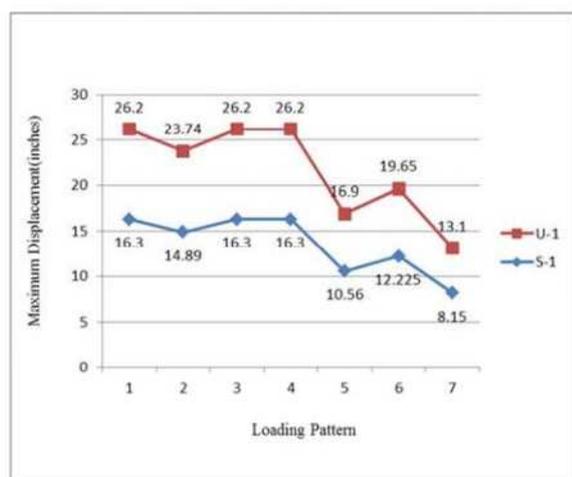


图 11.暴露 B 中 120 mph 的最大位移 w.r.t 荷载模式的比较。

在上图中，加载模式 1、3 和 4 具有相同的响应。加载模式 5 和 7 显示最低响应。如果风以一定的入射角从法线吹向跨度，则力将减小一个系数，该系数等于入射角余弦的平方。各种荷载模式中的比例因子与从法线到跨度的某个入射角相对应。对于 30 度入射角倾斜风，考虑比例系数 0.75，对于 60 度倾斜风考虑比例系数 0.5。

#### 5.结论

在本研究中，荷载模式条件下的比例因子表示了 30 度和 60 度的倾斜风，然后将案例研究模型的响应与正交风（0 度和 90 度）和倾斜风（45 度）的代码定义比例因子的差异进行比较。超过 45 度的斜风将减少总响应的近一半。因此，ASCE 减少了 25% 的负荷，以覆盖实际情况。根据案例研究，正交风条件适用于 30 度和 60 度倾斜风。为了考虑斜向风可能引起的更严重的影响，以及结构在横风方向上摇摆的趋势，应设计更高的结构，以抵抗同时施加的每个主要方向 75% 的最大风压。为了真正了解强风情况，应在建筑物周围进行风

洞或气流模拟。

#### 致谢

提交人感谢仰光理工大学校长 Aye Myint 博士的支持和鼓励，感谢他在整个学习期间提供的宝贵建议和有效帮助。

作者衷心感谢她的共同导师、仰光理工大学土木工程系副教授 Khin Aye Mon 博士的鼓励、有益的建议和监督，感谢他的特别讲座、有益的建议以及热情的指导、宝贵的帮助和不可或缺的指导。

#### 参考文献:

- [1] John D. Holmes. 2001. Wind Loading of Structures. Spon Press, London.
- [2] Y.Tamura, A. Kareem. 2013. Advanced Structural Wind Engineering. Springer Press, New York.
- [3] ASCE 7-05. 1995, 1998, 2002, 2005, 2010. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. American Society of Civil Engineers.
- [4] H. Shirato. 2014. Special Lectures for Wind and Earthquake Engineering Department of Civil and Earth Resources Engineering, Kyoto University.
- [5] Davenport, A. G. 1961. "The Application of Statistical Concepts to the Windloading of structures", Proceedings of Institution of Civil Engineers, London.
- [6] Taranath, B. S. 2011. Structural Analysis and Design of Tall Buildings Steel and Composite Construction. CRC Press.
- [7] Bungale S.Taranath. 2005. Wind and Earthquake Resistant Buildings. Marcel Dekker Publication, New York, U.S.A.
- [8] ASCE 7-10-Commentary. 2010. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. American Society of Civil Engineers.
- [9] Nikhil Agrawal, V. K. Gupta, Amit Gupta, Achal Mittal. 2012, "Comparison of Codal Values and Experimental Data Pertaining to Dynamic Wind Characteristics". Journal of Wind Engineering, Vol. 9, No. 1, January.
- [10] Stathopoulos, T., Elsharawy, M., and Galal, K. 2013. "Wind load combinations including torsion for rectangular mediumrise buildings". International Journal of High-Rise Buildings, 2(3), 1-11.
- [11] AIJ-RLB. 2004. Recommendations on Loads for Buildings. Architectural Institute of Japan.
- [12] NBCC 2010. National Building Code of Canada. National Research Council Canada, Ottawa.